

**ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TRANSFORMATOR 3 FASE
TERHADAP SUSUT DAYA PADA JARINGAN DISTRIBUSI
PT.PLN (PERSERO) RAYON BOYOLALI**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I
pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik**

Oleh:

DANDI RUKMANA

D400160112

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA**

2020

HALAMAN PERSETUJUAN

**ANALISIS PENGARUHH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN
TRANSFORMATOR 3 FASE TERHADAP SUSUT DAYA PADA JARINGAN
DISTRIBUSI PT.PLN (PERSERO) RAYON BOYOLALI**

PUBLIKASI ILMIAH

oleh:

DANDI RUKMANA

D400160112

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing



Agus Supardi

NIK. 883

HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN
TRANSFORMATOR 3 FASE TERHADAP SUSUT DAYA PADA JARINGAN
DISTRIBUSI PT.PLN (PERSERO) RAYON BOYOLALI**

OLEH

DANDI RUKMANA

D400160112

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah Surakarta
Pada hari Selasa, 9 Februari 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Dewan Penguji:

1. Agus Supardi, ST.MT

(Ketua Dewan Penguji)

(.....)

2. Aris Budiman, ST.MT

(Anggota I Dewan Penguji)

(.....)

3. Hasyim Asy'ari, ST.MT

(Anggota II Dewan Penguji)

(.....)

Dekan,



Sumarjono, MT., PhD

NIK. 628

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam naskah publikasi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, Selasa, 9 Februari 2021

Penulis



DANDI RUKMANA

D400160112

ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TRANSFORMATOR 3 FASE TERHADAP SUSUT DAYA PADA JARINGAN DISTRIBUSI PT.PLN (PERSERO) RAYON BOYOLALI

Abstrak

Permasalahan sistem distribusi tenaga listrik tidak terlepas dari adanya transformator 3 fase yang berfungsi untuk menurunkan nilai tegangan dari sistem distribusi jaringan primer 20 kV ke nilai tegangan konsumen/pengguna pada sistem jaringan tegangan rendah 380/220V. Saat perencanaan, pembagian beban transformator setiap fasenya akan dirancang secara seimbang, namun kenyataannya beban setiap fase akan sulit bernilai seimbang dikarenakan penggunaan setiap beban fase berbeda-beda serta sangat variatif. Apabila hal ini terjadi, maka akan menimbulkan susut daya yang akan merugikan pihak PT.PLN (persero) Rayon Boyolali, selain itu juga akan mengurangi tingkat efisiensi sistem pendistribusian tenaga listrik. Analisa menggunakan software ETAP ini bertujuan agar pihak penyedia tenaga listrik mengetahui trafo mana saja yang memiliki nilai ketidakseimbangan besar dan mengantisipasi hal tersebut dengan melakukan penyeimbangan beban agar susut daya yang dihasilkan bernilai relatif kecil. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada transformator distribusi wilayah PLN rayon Boyolali maka diperoleh nilai susut daya akibat penghantar netral terbesar sebesar 10091,31 Watt pada trafo BY1-16/29A dan susut daya akibat arus yang mengalir ke tanah sebesar 15440,69 Watt pada trafo BY1-93.

Kata Kunci: ketidakseimbangan, susut daya, sistem tenaga listrik.

Abstract

Electrical power distribution system is inseparable from the 3 phases distribution transformer that has function to step up and step down the main voltage value from the electrical distribution system for the voltage utilization of consumer use. During the design of the electrical distribution system, the distribution of the load transformers for each phase will be designed in a balanced manner, but in reality the load of each phase will be difficult to be balanced because the load usage of each phase are different. If that thing happens, it will cause a shrinkage of the power that will harm PT PLN (Persero) and also it will reduce the level of electricity efficiency. The calculation and simulation with ETAP 12.6.0 on the influence of imbalance transformer load, aims to make the electricity provider knows which transformer have large imbalance value and anticipate it by balancing the load so that, the resulting loss of power has small value. Based on the analysis that has been carried on the distribution transformer of the PLN rayon Boyolali area, the value of the power loss due to the largest neutral conductor is 10091,31 Watt on the BY1-16/29A and the power loss due to current flowing to the ground is 15440,69 Watt on the BY1-93 transformer.

Keywords: imbalance, shrinkage, power system.

1. PENDAHULUAN

PT.PLN (persero) merupakan perusahaan BUMN yang bergerak pada bidang kelistrikan. sebagai perusahaan BUMN yang masih menerima subsidi dari pemerintah, PT.PLN (persero) diminta untuk lebih efektif dalam melaksanakan seluruh proses bisnisnya termasuk dalam masalah pengendalian susut daya / *losses*. Penyusutan daya belum memungkinkan untuk dihindari karena sampai saat ini belum ada peralatan yang memiliki tingkat efisiensi sampai 100%, maka dari itu yang harus diperhatikan disini adalah batas dari susut daya tersebut dalam batas wajar atau tidak. jika tidak wajar maka harus dilakukan tindakan untuk menekan susut daya yang terjadi pada sistem tenaga listrik. PT.PLN (persero) diharap melakukan usaha untuk mengatasi susut jaringan baik secara teknis maupun non teknis seperti misalnya melakukan pengkajian atas fungsi peralatan dan proses penyaluran energi listrik kepada pelanggan.

Pemakaian beban listrik yang tidak seimbang dengan besar langganan daya dapat menyebabkan tidak *efisien* dalam hal pembiayaan. Hal ini menyebabkan tingginya biaya rekening listrik yang dibayarkan setiap bulannya. Ditambah pula dengan diberlakukannya denda penalti akibat rendahnya faktor daya khusus untuk langganan tegangan menengah. Rendahnya efisiensi trafo yang berarti besarnya *losses* (rugi-rugi) dapat menyebabkan kerugian di sisi *power provider* dalam hal ini PT. PLN (Persero) dan konsumen terutama bagi pelanggan tegangan menengah. Rendahnya efisiensi trafo dapat disebabkan oleh rendahnya faktor daya, serta rendahnya pembebanan akibat pemakaian beban *non linier*. (Ermawanto, 2011).

Susut daya ditinjau dari penyebabnya dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu susut teknis yang penyebab penyusutannya berasal dari adanya impedansi pada peralatan impedansi sedangkan susut non teknis penyebab penyusutannya berasal dari kesalahan dalam pembacaan alat ukur, kalibrasi alat ukur, ataupun kesalahan yang bersifat administratif lainnya (Sugianto, 2019)

Faktor atau penyebab lain dari adanya susut daya yaitu kebocoran isolator akibat penurunan tegangan. Penurunan tegangan merupakan indikator utama dalam kualitas daya dan memiliki pengaruh besar pada keadaan normal peralatan listrik (Vujosevic, L, 2002)

Pembebanan yang tidak seimbang ini disebabkan karena saat pasang baru atau penambahan daya pada pelanggan kurang diperhatikan keseimbangan arus beban antar fase (Tobing, 2014). Akibat dari adanya beban yang tidak seimbang ini akan menyebabkan timbulnya arus netral pada penghantar netral ataupun penghantar tanah (*ground*) yang menyebabkan susut daya karena kedua penghantar tersebut mempunyai resistansi (Syahputra & Harahap, 2017).

Perhitungan susut daya dapat dilakukan menggunakan berbagai macam cara, salah satunya menggunakan perhitungan manual. Namun cara tersebut membutuhkan waktu yang tidak sebentar dan terkadang hasilnya tidak terlalu akurat. ETAP (*Electrical Transient and Analysis Program*) merupakan salah satu program atau *software* yang dapat membantu mempermudah perhitungan dan simulasi dalam mencari susut daya. Studi aliran beban dapat digunakan untuk menentukan ukuran optimum dan lokasi kapasitor untuk mengatasi masalah tegangan (Kapahi .R, 2013)

Penelitian tugas akhir ini adalah Analisis ketidakseimbangan pada transformator 3 fase terhadap susut daya pada jaringan distribusi PT.PLN (persero) Rayon Boyolali dengan simulasi ETAP. Bertujuan agar pihak PT.PLN (persero) Rayon Boyolali mengetahui trafo mana saja yang memiliki nilai ketidakseimbangan besar dan mengantisipasi hal tersebut dengan melakukan penyeimbangan beban agar nilai susut daya relatif kecil sehingga kerugian yang didapat oleh penyedia listrik juga relatif kecil.

2. METODE

2.1 Studi Literatur

Studi literatur merupakan langkah pengumpulan atau proses pencarian referensi buku, jurnal, atau landasan teori yang mendukung teori untuk pembuatan tugas akhir agar lebih mudah untuk dikerjakan.

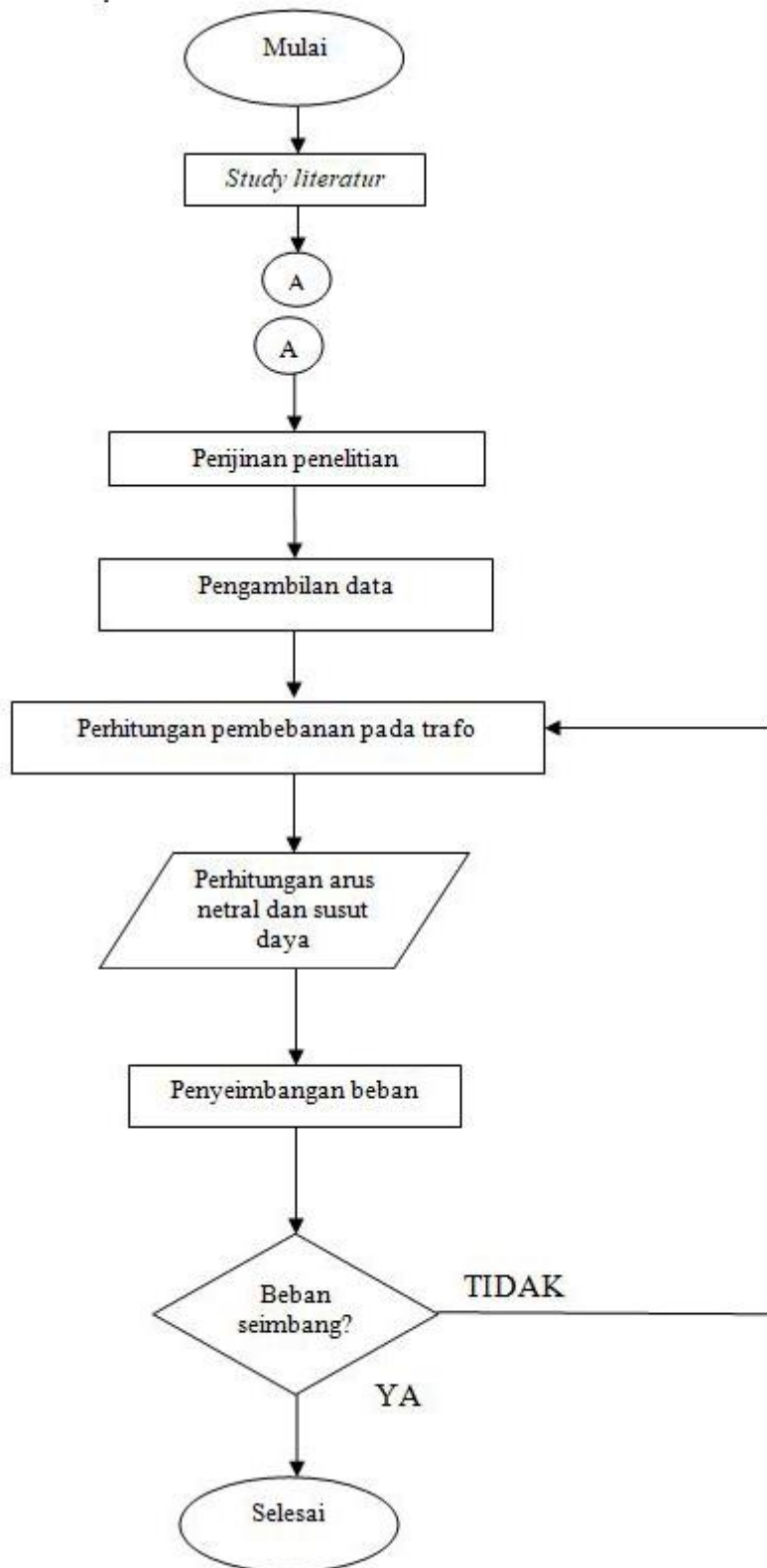
2.2 Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data dilakukan dengan cara yang sudah ditentukan oleh instansi terkait yaitu PLN rayon Boyolali dimana penulis diminta untuk membuat surat pengantar dari universitas untuk pengambilan data. Data yang diperoleh akan digunakan sebagai bahan untuk menyusun perhitungan, simulasi dan analisis.

2.3 Analisis Data

Proses ini digunakan untuk memahami dan menganalisa perhitungan yang telah dilakukan serta melakukan simulasi supaya dapat diketahui apakah sistem bekerja dengan baik atau tidak, simulasi menggunakan ETAP digunakan sebagai perbandingan apakah perhitungan yang dilakukan secara manual sesuai dengan apa yang ada di simulasi.

2.4 Flowchart



Gambar 1. *Flowchart* Proses Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Transformator Distribusi

3.1.1 Data transformator distribusi 160kVA

| | |
|--------------------|---|
| Nama Transformator | : Unindo |
| Daya | : 160 kVA |
| Fasa | : 3 |
| Arus | : 4,6 – 230,9 A |
| Tegangan primer | : 20kV |
| Tegangan sekunder | : 400V |
| Kabel input | : AAAC 70 mm ² , dengan R : 0,582 Ω /km |
| Kabel output | : LVTC 70mm ² , dengan R : 0,453 Ω /km |
| Impedansi | : 4% |
| Cos ϕ | : 0,85 |

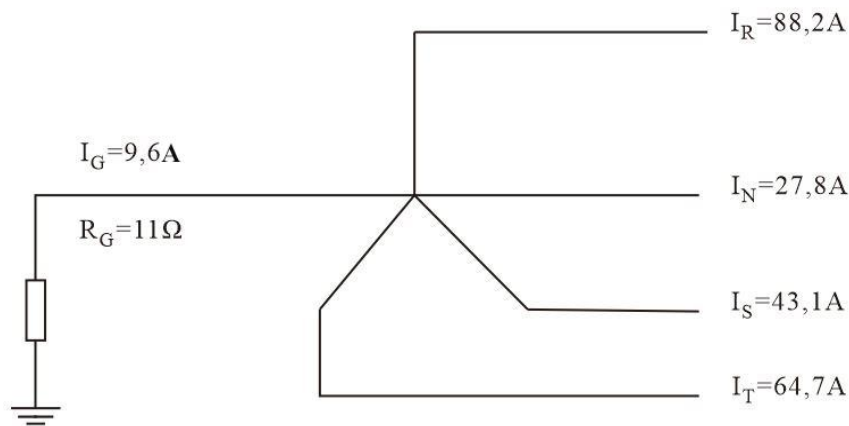
Tabel 1. Data pembebanan transformator dengan nomor tiang BY1-16/22

| No Tiang | Daya (kVA) | Arus Beban | | | | I_G | R_G |
|------------------|------------|------------|------|------|---|-------|-------|
| | | R | S | T | N | | |
| BY1-16/22 | 160 | 88,2 | 43,1 | 64,7 | | 9,6 | 11 |

3.2 Analisis Pembebanan Transformator

Analisis pembebanan transformator dilakukan untuk mengetahui persentase pembebanan pada transformator. Apabila pada waktu beban puncak, pembebanan transformator melebihi kapasitas yang tertera pada *nameplate* atau persentase melebihi 100% maka akan terjadi beban *overload*. *Overload* pada transformator akan mengakibatkan suhu pada transformator menjadi tinggi, dan bila hal tersebut terjadi secara terus-menerus akan memperpendek umur isolasi.

Skema arus transformator pada gambar 2 merupakan skema arus pada transformator sistem hubung bintang (Y) pada tiang dengan nomor BY1-16/22 . Nilai arus yang tertera pada skema aliran arus pada gambar diperoleh berdasarkan pengukuran pada tanggal 1 oktober 2020 pada pukul 18.00.



Gambar 2. Skema Aliran Arus Transformator

Berdasarkan data transformasi di atas dapat dilakukan perhitungan nilai arus beban/*full load* (I_{fl}) dengan menggunakan nilai daya pengenalan (S) dan tegangan pengenalan (V) transformator dengan persamaan (1).

$$\begin{aligned}
 I_{fl} &= \frac{S}{V\sqrt{3}} \\
 &= \frac{160.000V}{400\sqrt{3}} \\
 &= 230,9 \text{ A}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Nilai arus saat beban penuh tersebut dalam perhitungan persentase pembebanan transformator pada masing-masing fase. Berdasarkan pengukuran yang telah dilakukan diperoleh nilai arus fase R sebesar 88,2 A, arus fase S sebesar 43,1 A, dan arus fase T sebesar 64,7 A.

- $$\begin{aligned}
 \bullet \quad \%R &= \frac{I_R}{I_{fl}} \times 100\% \\
 &= \frac{88,2}{230,9} \times 100\% \\
 &= 38,19\%
 \end{aligned} \tag{2}$$
- $$\begin{aligned}
 \bullet \quad \%S &= \frac{I_S}{I_{fl}} \times 100\% \\
 &= \frac{43,1}{230,9} \times 100\% \\
 &= 18,66\%
 \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned}
 \bullet \quad \%T &= \frac{I_T}{I_{fl}} \times 100\% \\
 &= \frac{64,7}{230,9} \times 100\% \\
 &= 28,015\%
 \end{aligned}$$

berdasarkan pada perhitungan nomor 2 dapat diketahui bahwa nilai persentase pembebanan rata-rata pada transformator dengan nomor BY1-16/22 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \%X &= \frac{\%R + \%S + \%T}{3} \\
 &= \frac{38,19\% + 18,66\% + 28,015\%}{3} \\
 &= 28,29\%
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Sistem konsumsi energi listrik oleh pelanggan dikenal dalam dua kondisi yaitu kondisi saat beban puncak (WBP) pada pukul 18.00 sampai pada pukul 22.00 dan kondisi saat luar waktu beban puncak (LWBP) pada pukul 23.00 sampai pada pukul 17.00. Pada kondisi waktu beban puncak nilai total dari beban yang dipakai pada transformator dengan nomor BY1-16/22 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 S &= \%X \times \text{daya pengenalan trafo} \\
 &= 28,29\% \times 160 \text{ kVA} \\
 &= 45,264 \text{ kVA}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

3.3 Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator

Ketidakseimbangan beban trafo memiliki standar persentase ketidakseimbangan sebesar 2% berdasarkan **SPLN D5.004-1:2012**. *regulasi harmonisa, flicker*, dan ketidakseimbangan tegangan. Sebelum mencari nilai persentase ketidakseimbangan beban pada transformator, terlebih dahulu mencari nilai arus beban rata-rata pada kondisi seimbang.

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \\
 &= \frac{88,2 + 43,1 + 64,7}{3} \\
 &= 65,33 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Nilai beban arus rata-rata pada kondisi seimbang di atas digunakan untuk mencari nilai koefisien ketidakseimbangan beban pada masing-masing fasa transformator. Koefisien a untuk menyatakan ketidakseimbangan pada fasa R, untuk b menyatakan ketidakseimbangan pada fasa S, sedangkan koefisien c untuk menyatakan ketidakseimbangan pada fasa T.

$$\begin{aligned}
 \text{a. } \frac{I_R}{I} &= \frac{88,2}{65,33} = 1,35 \\
 \text{b. } \frac{I_S}{I} &= \frac{43,1}{65,33} = 0,65 \\
 \text{c. } \frac{I_T}{I} &= \frac{64,7}{65,33} = 0,99
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Koefisien ketidakseimbangan beban transformator baik koefisien A, B, dan C menunjukkan beban yang seimbang apabila bernilai 1, sedangkan pada perhitungan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa beban pada transformator tidak seimbang sehingga dapat dilakukan perhitungan persentase ketidakseimbangan (%k) beban transformator.

$$\begin{aligned}\%k &= \frac{(|a-1|)+(|b-1|)+(|c-1|)}{3} \times 100\% \\ &= \frac{(|1,35-1|)+(|0,65-1|)+(|0,99-1|)}{3} \times 100\% \\ &= 23,33\%\end{aligned}\tag{7}$$

3.4 Perhitungan Arus Netral

Ketidakseimbangan beban pada transformator akan menyebabkan timbulnya arus netral. Arus netral dalam sistem distribusi tenaga listrik dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah. Nilai arus netral sendiri akan bernilai nol apabila beban setiap fasa transformator seimbang, dan apabila beban pada transformator tidak seimbang maka nilai arus netralnya dapat diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut.

Tabel 2. Data pembebanan transformator

| Fase | I (Ampere) | V _{F-N} (Volt) | Cos θ | θ |
|------|------------|-------------------------|-------|-------|
| R | 88,2 | 228.6 | 0,85 | 31,78 |
| S | 43,1 | 228.3 | 0,85 | 31,78 |
| T | 64,7 | 228.7 | 0,85 | 31,78 |
| N | 27,8 | | | |

$$\begin{aligned}I_N &= I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S ((\cos(\theta-120^\circ) + (j \sin(\theta-120^\circ))) + I_T ((\cos(\theta+120^\circ) + (j \sin(\theta+120^\circ))) \\ &= 88,2 (0,85 + j0,52) + 43,1 (0,03 - j0,99) + 64,7 (-0,88 + j0,47) \\ &= (74,97 + 45,86j) + (1,29 - 42,67j) + (-56,94 + 30,41j) \\ &= (19,32 + 33,6j) \text{ A} \\ I_N &= \sqrt{19,32^2 + 33,6^2} \text{ A} \\ &= 38,75 \text{ A}\end{aligned}\tag{8}$$

Nilai arus netral pada transformator distribusi 3 fase juga dapat digunakan untuk menentukan arah sudut yang dapat arah sudut yang dapat memperkuat tanda bahwa transformator bersifat tidak seimbang. Agar dapat mengetahui arah sudut dapat digunakan persamaan (9).

$$\theta = \tan^{-1} \frac{33,6}{19,32} = 60,09^\circ\tag{9}$$

Hasil perhitungan yang telah dilakukan memperoleh nilai arus netral yang lebih besar dibandingkan hasil pengukuran, hal tersebut dapat dikarenakan kesalahan dalam pembacaan alat ukur ataupun karena tingkat ketelitian dari alat ukur yang digunakan. Di bawah ini merupakan Faktor Kesalahan (FK) yang telah diperoleh.

$$FK = \frac{38,75 - 27,8}{38,75} \times 100\% = 28,39\%\tag{10}$$

3.5 Perhitungan Susut Daya Akibat Arus Netral pada Penghantar Netral Transformator

Arus yang mengalir pada sepanjang kawat netral pada transformator akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral. Rugi daya atau susut daya menyebabkan daya yang sampai di ujung terima akan lebih kecil dari ujung kirim dikarenakan adanya penyusutan. Jenis penghantar dan diameter pada penghantar akan mempengaruhi besarnya nilai susut daya pada transformator. Pada transformator dengan nomor BY1-16/22 menggunakan penghantar AAAC dengan diameter 70 mm². Berdasarkan standar perusahaan umum listrik negara (SPLN) 41-8:1981 penghantar AAAC memiliki ukuran konstruksi seperti tabel 3.

Tabel 3. Ukuran Konstruksi Penghantar AAAC

| Luas penampang | | Jumlah | Diamete | Berat | Perbedaan | Tahanan | Beban |
|-----------------|-----------------|---------|---------|---------|-----------|----------|-----------|
| | | kawat | r | hantara | berat | DC, 20°C | putus |
| Nomina | Sebenarnya | diamete | hantara | n kira- | maksimu | maksimu | perhitung |
| l | a | r kawat | n kira- | kira | m | m | an |
| | | n/dl | kira d2 | | | | |
| mm ² | mm ² | n/mm | mm | Kg/km | | Ω/km | kg |
| 16 | 16,84 | 7/1,75 | 5,25 | 46 | ±2,9 | 1,955 | 480 |
| 25 | 27,83 | 7/1,25 | 6,75 | 76 | ±2,2 | 1,183 | 480 |
| 35 | 34,36 | 7/1,25 | 7,50 | 94 | ±2,0 | 0,958 | 980 |
| 50 | 49,48 | 7/3,0 | 9,0 | 135 | ±2,0 | 0,665 | 1410 |
| | 45,70 | 19/1,75 | 8,75 | 126 | ±2,9 | 0,724 | 1300 |
| 55 | 58,07 | 7/3,25 | 9,75 | 160 | ±2,0 | 0,567 | 1655 |
| 70 | 75,55 | 19/2,25 | 11,25 | 208 | ±2,2 | 0,438 | 2150 |

Berdasarkan tabel 3 dapat diketahui nilai resistansi (R) pada penghantar netral yang digunakan adalah sebesar 0,438 Ω/km, sedangkan panjang penghantar sebesar 2547 meter dikali dengan 1,03 untuk mempertimbangkan andongan penghantar antar tiang, sehingga dapat diperoleh nilai panjang penghantar total (L) sebesar 2623,41m dengan resistansi (R_N) dan nilai susut daya (P_N) seperti persamaan (11) dan (12).

$$R_N = R \times L \quad (11)$$

$$= 0,438 \, \Omega/\text{km} \times 2,62341 \text{ km}$$

$$= 1,149 \, \Omega$$

$$P_N = (I_N)^2 \times R_N \quad (12)$$

$$= (27,8 \text{ A})^2 \times 1,149 \Omega$$

$$= 887,99 \text{ Watt}$$

Berdasarkan perhitungan yang sudah dilakukan dapat diketahui bahwa semakin besar nilai arus netral dan semakin besar panjang penghantar, maka akan semakin besar pula nilai dari susut daya transformator.

3.6 Perhitungan Susut Daya Akibat Arus yang Mengalir ke Tanah

Arus yang mengalir ke tanah akan menghasilkan susut daya dikarenakan terdapat resistansi pada sistem pentanahan (*grounding*). Resistansi pada sistem pentanahan sendiri besarnya akan dipengaruhi oleh jenis tanah, diameter ataupun jumlah elektroda pada sistem pentanahan. Gambar 2 menunjukkan bahwa nilai arus pentanahan sebesar 9,6 A dan resistansi pentanahan 11 Ω . dari data diatas dapat diketahui bahwa nilai susut daya (P_G) dengan perhitungan (13) ini.

$$P_G = I_G^2 \times R_G \quad (13)$$

$$= (9,6 \text{ A})^2 \times 11 \Omega$$

$$= 1013,76 \text{ Watt}$$

3.7 Penyeimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban transformator distribusi 3 fase menyebabkan timbulnya arus netral yang dapat menyebabkan kerugian pada penyedia energi listrik dalam hal ini adalah PT.PLN (persero) juga dapat menyebabkan kurangnya nilai efisiensi dalam penyaluran energi listrik. Oleh karena itu, untuk menangani ketidakseimbangan beban pada transformator maka perlu dilakukan penyeimbangan beban transformator dilakukan dengan menentukan terlebih dahulu nilai dari arus beban rata-rata.

$$I = \frac{I_R(\cos\theta + j \sin\theta) + I_S(\cos\theta + j \sin\theta) + I_T(\cos\theta + j \sin\theta)}{3} \quad (14)$$

$$= \frac{88,2(\cos 31,78 + j \sin 31,78) + 43,1(\cos 31,78 + j \sin 31,78) + 64,7(\cos 31,78 + j \sin 31,78)}{3}$$

$$= \frac{(74,97 + j46,45) + (36,63 + j22,69) + (60,46 + j23,04)}{3}$$

$$= \sqrt{57,352^2 + 30,732^2} \text{ A}$$

$$= 65,064 \text{ A}$$

Arus beban rata-rata berdasarkan perhitungan bernilai 65,064 A sehingga untuk menyeimbangkan beban yang ada, setiap fase harus memiliki nilai arus yang mendekati nilai arus beban rata-rata.

- Fase R

$$I_R - I = 88,2 \text{ A} - 65,064 \text{ A} = 23,13 \text{ A} \quad (15)$$

agar memiliki beban arus yang bernilai seimbang arus fase R harus dikurangi 23,13 A

- Fase S

$$I_S - I = 38,1 \text{ A} - 65,064 \text{ A} = -21,96 \text{ A} \quad (16)$$

agar memiliki beban arus yang bernilai seimbang arus fase S harus ditambah 21,96 A

- Fase T

$$I_T - I = 64,7 \text{ A} - 65,064 \text{ A} = -0,36 \text{ A} \quad (17)$$

agar memiliki beban arus yang bernilai seimbang arus fase T harus ditambah 0,36 A

Berdasarkan perhitungan di atas dapat dilakukan penyeimbangan sebesar 23,13 A pada fase R lalu menambah beban 21,96 A pada fase S, dan menambahkan beban 0,36 A pada fase T. Saat waktu beban puncak pemakaian energi listrik pada setiap pelanggan bernilai 0,282 kali dari daya kontraknya, nilai tersebut dapat diperoleh dari daya beban saat pengukuran waktu beban puncak lalu dibagi dengan daya pengenalan trafo. Sedangkan daya pelanggan jika dikonversikan dalam arus yaitu 450 VA menjadi 2 A dimana 450 VA dibagi dengan 220 V, begitu juga dengan daya pelanggan lainnya. Berdasarkan nilai arus tersebut dapat dilakukan penyeimbangan beban transformator 3 fase seperti persamaan (18), (19), dan (20).

$$I_R = 88,2 - ((81 \text{ A} \cdot 0,282) + (2 \text{ A} \cdot 0,282)) = 65,92 \text{ A} \quad (18)$$

Nilai 81 A dan 2 A pada perhitungan diatas diperoleh dari perkalian pelanggan dengan konversi arus dari daya kontraknya.

$$I_S = 43,1 + (81 \text{ A} \cdot 0,282) = 65,94 \text{ A} \quad (19)$$

$$I_T = 64,7 - (2 \text{ A} \cdot 0,282) = 65,26 \text{ A} \quad (20)$$

Pembebanan transformator yang telah bernilai seimbang, maka akan dihasilkan nilai arus netral sebagai berikut.

$$\begin{aligned} I_N &= I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S ((\cos(\theta-120^\circ) + (j \sin(\theta-120^\circ))) + I_T (\cos(\theta+120^\circ) + (j \sin(\theta+120^\circ))) \\ &= 65,92 (0,85 + j0,52) + 65,94 (0,03 - j0,99) + 65,26 (-0,88 + j0,47) \\ &= (56,03 + 34,28j) + (1,98 - 65,28j) + (-57,43 + 30,67j) \\ &= (0,58 - 0,33j) \text{ A} \\ &= \sqrt{0,58^2 - 0,33^2} \\ &= 0,476 \text{ A} \end{aligned} \quad (21)$$

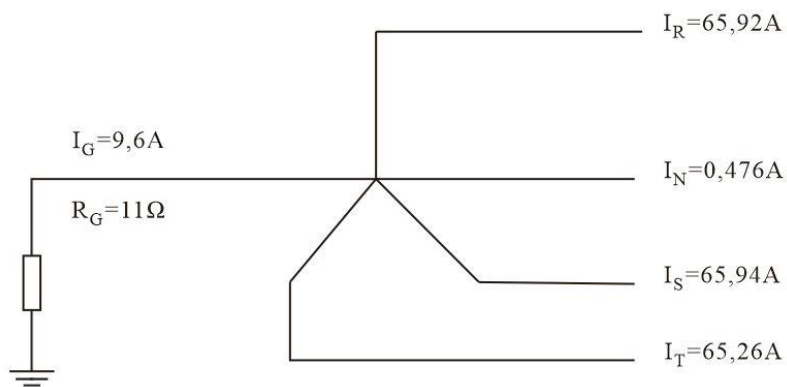
$$\theta = \tan^{-1} \frac{0,33}{0,58} = 29,59^\circ$$

Setelah dilakukan penyeimbangan dilakukan penyeimbangan beban maka skema aliran arus pada transformator dengan nomor BY1-16/22 dan nilai susut daya akibat arus netral pada penghantar netral transformator yang dihasilkan menjadi seperti persamaan (22) dan (23).

$$\begin{aligned} R_N &= R \times L \\ &= 0,438 \text{ } \Omega/\text{km} \times 2,62341 \text{ km} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
 &= 1,149 \, \Omega \\
 P_N &= (I_N)^2 \times R_N \\
 &= (0,476 \, \text{A})^2 \times 1,149 \, \Omega \\
 &= 0,226 \times 1,149 \\
 &= 0,260 \, \text{Watt}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

Nilai susut daya yang telah dihasilkan dari arus netral pada penghantar netral transformator distribusi 3 fase setelah dilakukan penyeimbangan beban menjadi jauh lebih kecil dibandingkan dengan saat beban pada transformator dalam kondisi tidak seimbang. Hal tersebut membuktikan bahwa ketidakseseimbangan beban pada transformator 3 fase menyebabkan kerugian apabila terjadi secara terus menerus akan semakin besar. Kerugian yang dihasilkan dari ketidakseimbangan beban pada transformator 3 fase ini selain dirasakan oleh PLN selaku penyedia layanan tenaga listrik juga akan dirasakan oleh pelanggan atau pengguna listrik.



Gambar 3. skema aliran arus transformator setelah beban diseimbangkan

3.8 Simulasi Ketidakseimbangan Beban Transformator Menggunakan Aplikasi ETAP

Simulasi ketidakseimbangan beban transformator pada software ETAP 12.6.0 disini bertujuan supaya pengaruh dari ketidakseimbangan beban transformator terhadap sistem distribusi energi listrik dapat diketahui. Simulasi yang digunakan dalam software ETAP 12.6.0 disini adalah simulasi *Unbalanced Load Flow Analysis*.

Tabel 4. *Unbalanced Load Flow Analysis* ETAP 12.6.0

Unbalanced Load Flow Report

| Bus | | Voltage | | | Generation | | Load | | Load Flow | | | | | | | XFMR |
|--------|---------|---------|---------|--------|------------|-------|------|------|-----------|--------|--------|--------|-------|------|-------|------|
| ID | kV | Phase | % Mag. | Ang. | MW | Mvar | MW | Mvar | ID | Phase | MW | Mvar | Amp | % PF | % Tap | |
| * Bus1 | 150.000 | A | 100.000 | 0.0 | 0.010 | 0.008 | 0 | 0 | Bus5 | A | 0.017 | 0.010 | 88.6 | 86.4 | | |
| | | B | 100.000 | -120.0 | 0.014 | 0.005 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| | | C | 100.000 | 120.0 | 0.015 | 0.010 | 0 | 0 | | N | | | | 88.6 | | |
| Bus2 | 20.000 | A | 99.993 | -30.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Bus6 | B | 0.009 | 0.005 | 43.9 | 85.7 | | |
| | | B | 99.997 | -150.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | N | | | | 43.9 | | |
| | | C | 99.995 | 90.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | Bus7 | C | 0.013 | 0.007 | 64.1 | 86.1 | |
| | | | | | | | | N | | | | | 64.1 | | | |
| | | | | | | | | Bus3 | A | | -0.017 | -0.010 | 88.6 | 86.4 | | |
| | | | | | | | | | B | -0.009 | -0.005 | 43.9 | 85.7 | | | |
| | | | | | | | | | C | -0.013 | -0.007 | 64.1 | 86.1 | | | |
| | | | | | | | | | | N | | | 38.9 | | | |
| Bus3 | 20.000 | A | 99.992 | -30.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| | | B | 99.995 | -150.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| | | C | 99.993 | 90.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| Bus4 | 0.400 | A | 98.519 | -60.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| | | B | 99.260 | 179.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| | | C | 98.927 | 59.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |

Hasil laporan di atas merupakan tabel *Unbalanced load flow analysis* yang menunjukkan setiap fase dilambangkan A, B, C, dan N dimana A merupakan fase R, B untuk fase S, lalu C melambangkan fase T dan N melambangkan fase netral. Berdasarkan tabel 4, hasil simulasi ETAP tersebut menunjukkan nilai arus netral sebesar 38,9 A mendekati nilai dari pengukuran ataupun perhitungan yang telah dilakukan secara manual.

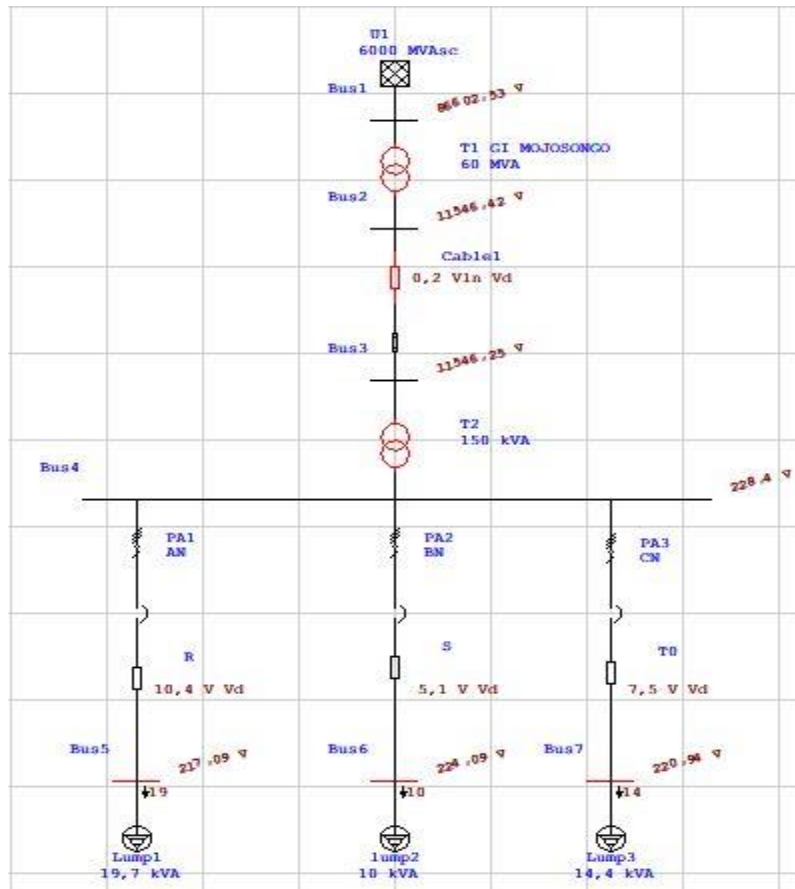
Branch Losses Summary Report

| CKT / Branch | | From-To Bus Flow | | To-From Bus Flow | | Losses | | % Bus Voltage | | Vd | Amperes |
|-----------------|-------|------------------|-------|------------------|--------|--------|------|---------------|-------|----------------|-------------------|
| ID | Phase | MW | Mvar | MW | Mvar | kW | kvar | From | To | % Drop in Vmag | in Buried Winding |
| Cable1 | A | 0.012 | 0.010 | -0.012 | -0.010 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100.0 | 0.00 | 0.00 |
| | B | 0.011 | 0.005 | -0.011 | -0.005 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100.0 | 0.00 | 0.00 |
| | C | 0.016 | 0.008 | -0.016 | -0.008 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100.0 | 0.00 | 0.00 |
| R | A | 0.017 | 0.010 | -0.016 | -0.010 | 1.1 | 0.0 | 98.5 | 72.4 | 4.51 | 0.00 |
| S | B | 0.009 | 0.005 | -0.008 | -0.005 | 0.3 | 0.0 | 99.3 | 74.7 | 2.23 | 0.00 |
| T0 | C | 0.013 | 0.007 | -0.012 | -0.007 | 0.6 | 0.0 | 98.9 | 73.6 | 3.26 | 0.00 |
| T1 GI MOJOSONGO | A | 0.010 | 0.008 | -0.012 | -0.010 | -1.6 | -2.5 | 100.0 | 100.0 | 0.01 | 0.00 |
| | B | 0.014 | 0.005 | -0.011 | -0.005 | 3.0 | -0.2 | 100.0 | 100.0 | 0.00 | 0.00 |
| | C | 0.015 | 0.010 | -0.016 | -0.008 | -1.3 | 2.7 | 100.0 | 100.0 | 0.00 | 0.00 |
| T2 | A | 0.012 | 0.010 | -0.017 | -0.010 | -5.8 | 0.3 | 100.0 | 98.5 | 1.47 | 0.00 |
| | B | 0.011 | 0.005 | -0.009 | -0.005 | 2.7 | 0.1 | 100.0 | 99.3 | 0.74 | 0.00 |
| | C | 0.016 | 0.008 | -0.013 | -0.007 | 3.4 | 0.1 | 100.0 | 98.9 | 1.07 | 0.00 |
| | | | | | | 2.2 | 0.5 | | | | |

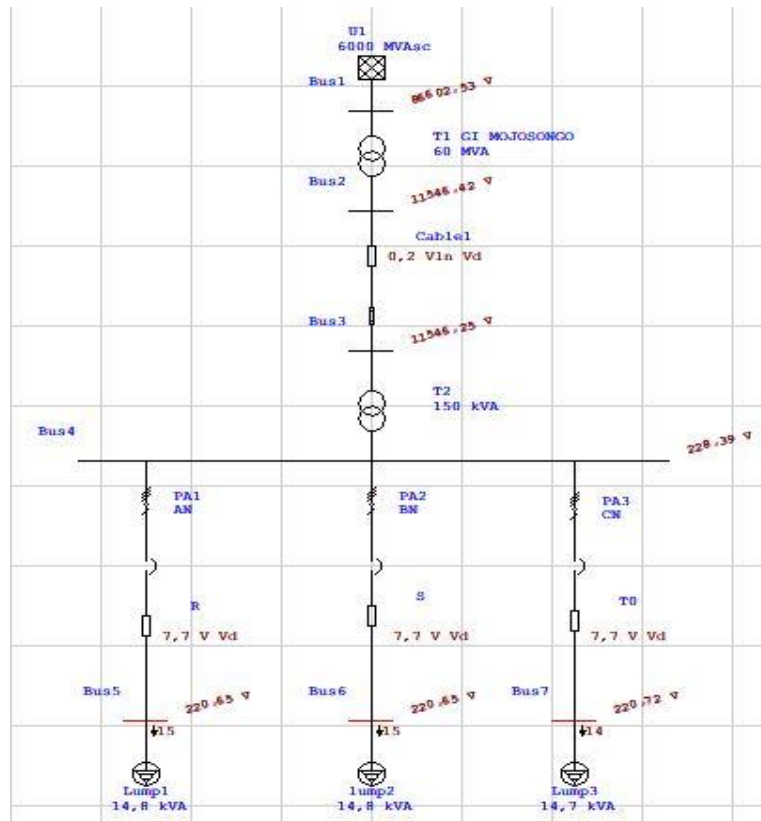
For branches below center-tap transformers, Phases A, B, and C correspond to (1), (2), and (N) respectively.

Gambar 5. Nilai susut daya hasil simulasi ETAP 12.6.0

Berdasarkan gambar 5 di atas yang menunjukkan nilai susut daya pada simulasi ETAP 12.6.0 yang mana *From-To Bus Flow* menunjukkan nilai daya yang terdapat pada masing-masing fase pada kabel ataupun trafo pada simulasi, sedangkan *To-From Bus Flow* menunjukkan daya yang terpakai pada sistem distribusi simulasi ETAP 12.6.0 sehingga dapat diketahui nilai *losses* yang tertampil pada tabel *Branch losses summary report* di atas.



Gambar 6. hasil run rangkaian *single line diagram* pada ETAP sebelum beban diseimbangkan



Gambar 7. hasil *run* rangkaian *single line diagram* pada ETAP setelah beban seimbang

Berdasarkan hasil *run* dari *single line diagram* pada gambar 6 di atas, Trafo 1 GI Mojosoongo dan Trafo 2 mengalami negatif dan positif *sequence* yang menandakan bahwa pembebanan arus transformator bernilai tidak seimbang ditunjukkan pada gambar 5. Dibawah ini merupakan hasil analisis susut daya serta analisis *unbalanced load flow* setelah berhasil diseimbangkan. Hasil simulasi ETAP tersebut menunjukkan nilai arus netral sebesar 0,5 A mendekati nilai dari pengukuran ataupun perhitungan yang telah dilakukan secara manual.

Unbalanced Load Flow Report

| Bus | | Voltage | | | Generation | | Load | | Load Flow | | | | | | XFMR |
|--------|---------|---------|---------|--------|------------|-------|------|------|-----------|-------|--------|--------|------|------|-------|
| ID | kV | Phase | % Mag. | Ang. | MW | Mvar | MW | Mvar | ID | Phase | MW | Mvar | Amp | % PF | % Tap |
| * Bus1 | 150.000 | A | 100.000 | 0.0 | 0.013 | 0.008 | 0 | 0 | Bus5 | A | 0.013 | 0.008 | 65.9 | 86.1 | |
| | | B | 100.000 | -120.0 | 0.013 | 0.008 | 0 | 0 | | | | | | | |
| | | C | 100.000 | 120.0 | 0.013 | 0.008 | 0 | 0 | | N | | | 65.9 | | |
| Bus2 | 20.000 | A | 99.995 | -30.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Bus6 | B | 0.013 | 0.008 | 65.9 | 86.1 | |
| | | B | 99.995 | -150.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | N | | | 65.9 | | |
| | | C | 99.995 | 90.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Bus7 | C | 0.013 | 0.008 | 65.4 | 86.1 | |
| Bus3 | 20.000 | | | | | | | | | N | | | 65.4 | | |
| | | | | | | | | | Bus3 | A | -0.013 | -0.008 | 65.9 | 86.1 | |
| | | | | | | | | | | B | -0.013 | -0.008 | 65.9 | 86.1 | |
| | | | | | | | | | | C | -0.013 | -0.008 | 65.4 | 86.1 | |
| | | | | | | | | | | N | | | 0.5 | | |
| Bus4 | 0.400 | A | 98.895 | -60.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |
| | | B | 98.895 | 179.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |
| | | C | 98.903 | 59.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |

Gambar 8. Hasil Analisis *Unbalanced Load Flow* Setelah Seimbang

Branch Losses Summary Report

| CKT / Branch | | From-To Bus Flow | | To-From Bus Flow | | Losses | | % Bus Voltage | | Vd % Drop in Vmag | Amperes in Buried Winding |
|-----------------|-------|------------------|-------|------------------|--------|--------|------|---------------|-------|-------------------------|---------------------------------|
| ID | Phase | MW | Mvar | MW | Mvar | kW | kvar | From | To | | |
| Cable1 | A | 0.013 | 0.008 | -0.013 | -0.008 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100.0 | 0.00 | 0.00 |
| | B | 0.013 | 0.008 | -0.013 | -0.008 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100.0 | 0.00 | 0.00 |
| | C | 0.013 | 0.008 | -0.013 | -0.008 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100.0 | 0.00 | 0.00 |
| R S T0 | A | 0.013 | 0.008 | -0.012 | -0.008 | 0.6 | 0.0 | 98.9 | 73.6 | 3.35 | 0.00 |
| | B | 0.013 | 0.008 | -0.012 | -0.008 | 0.6 | 0.0 | 98.9 | 73.6 | 3.35 | 0.00 |
| | C | 0.013 | 0.008 | -0.012 | -0.008 | 0.6 | 0.0 | 98.9 | 73.6 | 3.33 | 0.00 |
| T1 GI MOJOSONGO | A | 0.013 | 0.008 | -0.013 | -0.008 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100.0 | 0.01 | 0.00 |
| | B | 0.013 | 0.008 | -0.013 | -0.008 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100.0 | 0.01 | 0.00 |
| | C | 0.013 | 0.008 | -0.013 | -0.008 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100.0 | 0.01 | 0.00 |
| T2 | A | 0.013 | 0.008 | -0.013 | -0.008 | 0.1 | 0.2 | 100.0 | 98.9 | 1.10 | 0.00 |
| | B | 0.013 | 0.008 | -0.013 | -0.008 | 0.0 | 0.2 | 100.0 | 98.9 | 1.10 | 0.00 |
| | C | 0.013 | 0.008 | -0.013 | -0.008 | 0.2 | 0.2 | 100.0 | 98.9 | 1.09 | 0.00 |
| | | | | | | 2.1 | 0.5 | | | | |

For branches below center-tap transformers, Phases A, B, and C correspond to (1), (2), and (N) respectively.

Gambar 9. Hasil Analisis Susut Daya Pada Simulasi ETAP Setelah Seimbang

3.9 Hasil Perhitungan Arus Netral dan Susut Daya pada Wilayah Kerja PLN Rayon Boyolali

Data hasil penelitian dibawah ini merupakan data hasil pengukuran yang dilakukan pada bulan oktober pada pukul 18.00 saat pada kondisi waktu beban puncak.

Tabel 5. data kondisi pembebanan wilayah kerja PT.PLN Rayon Boyolali

| No | No Tiang | Daya | Arus Beban | cos θ | I _G | R _G |
|----|----------|------|------------|--------------|----------------|----------------|
|----|----------|------|------------|--------------|----------------|----------------|

| | | (kVA) | R | S | T | N | R | S | T | (A) | (Ω) |
|---|------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-----|
| 1 | BY1-16/29A | 100 | 160,6 | 193,6 | 126,3 | 85,7 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 7,3 | 9,6 |
| 2 | BY1-16/22 | 160 | 88,2 | 43,1 | 64,7 | 27,8 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 9,6 | 11 |
| 3 | BY1-93 | 200 | 214 | 145,5 | 144,6 | 63,3 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 64,6 | 3,7 |
| 4 | BY1-16/61 | 200 | 59,7 | 74,9 | 61,5 | 6,6 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 3,8 | 10 |

Berdasarkan data pada tabel 5 dapat dilakukan perhitungan seperti pada transformator BY1-16/22. Tabel 6 menunjukkan pengaruh dari ketidakseimbangan beban transformator distribusi 3 fase, dimana S (kVA) menunjukkan nilai total beban yang digunakan pada masing-masing transformator, lalu %k menunjukkan nilai persentase ketidakseimbangan beban transformator yang semua nilainya telah ditentukan sebesar 2%, I_N merupakan arus netral yang diperoleh dari perhitungan, P_N merupakan susut daya akibat arus yang mengalir ke tanah lalu P_G adalah susut daya yang diakibatkan oleh arus yang mengalir ke tanah. Berdasarkan perhitungan yang dilakukan dapat diketahui bahwa nilai total beban yang digunakan terbesar pada transformator dengan nomor BY1-16/29A sebesar 110,96 Watt, sedangkan transformator dengan nilai persentase ketidakseimbangan terbesar terdapat pada nomor tiang BY1-16/22. Nilai terbesar arus yang mengalir ke tanah terdapat pada transformator BY-93, sedangkan nilai susut daya akibat penghantar netral terbesar sebesar 10091,31 Watt pada trafo BY1-16/29A dan susut daya akibat arus yang mengalir ke tanah sebesar 15440,69 Watt pada trafo BY1-93.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Pengaruh Ketidakseimbangan beban Transformator pada wilayah PLN
Rayon Boyolali

| NO | NO TIANG | S(kVA) | %k | IN(A) | PN(Watt) | PG(Watt) |
|----|------------|--------|-------|--------|----------|----------|
| 1 | BY1-16/29A | 110,96 | 14,09 | 37,48 | 10091,32 | 511,58 |
| 2 | BY1-16/22 | 45,26 | 23,33 | 38,75 | 887,99 | 1013,76 |
| 3 | BY1-93 | 11,640 | 18,23 | 154,30 | 7993,56 | 15440,69 |
| 4 | BY1-16/61 | 45,280 | 9,72 | 24,25 | 81,63 | 144,4 |

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan serta analisis yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Agar beban transformator distribusi 3 fase dapat seimbang maka dapat dilakukan penyeimbangan beban pada setiap fase transformator
2. Transformator distribusi 3 fase pada wilayah PLN rayon Boyolali dalam keadaan tidak seimbang karena arus yang mengalir pada setiap fase berbeda-beda

3. Akibat dari besarnya nilai ketidakseimbangan beban transformator 3 fase akan menyebabkan susut daya pada penghantar netral dan penghantar pentanahan yang mengakibatkan kerugian bagi penyedia tenaga listrik
4. Berdasarkan hasil simulasi pada ETAP dapat diketahui bahwa perhitungan manual yang telah dilakukan cukup akurat mendekati nilai pada simulasi, hal ini menandakan bahwa perhitungan manual masih dapat digunakan tetapi membutuhkan waktu yang lebih lama.
5. Pada saat kondisi waktu beban puncak nilai arus netral yang dihasilkan pada transformator BY1-16/22 sebesar 445,264 A
6. Pada transformator BY1-16/22 nilai susut daya akibat arus yang mengalir ketanah pada wilayah PLN rayon Boyolali sebesar 1013,76 Watt sedangkan susut daya akibat penghantar netral sebesar 887,99 Watt.

PERSANTUNAN

Alhamdulillah puji syukur saya ucapkan kepada ALLAH SWT karena berkat rahmat yang diberikan penulis berhasil menyelesaikan tugas akhir ini dengan lancar. Tidak lupa sholawat serta salam saya curahkan kepada nabi Muhammad SAW. Penulisan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, maka dari itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua saya yang selalu mendukung penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.
2. Saudara-saudara saya terutama kakak saya Tri Marjoko yang membiayai perkuliahan penulis serta memberikan dukungan kepada penulis.
3. Bapak Agus Supardi, S.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu serta bimbingannya sehingga penulis berhasil menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Umar, S.T.,M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta dan seluruh jajaran dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta.
5. Rekan-rekan Jurusan Elektro angkatan 2016 Universitas Muhammadiyah Surakarta terutama sahabat penulis Ahmad Malik Ibrahim dan M Jidil Mustofa yang menemani serta memberikan bantuan saat masa perkuliahan dan saat pembuatan tugas akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Ermawanto. 2011. “Analisa Berlangganan Listrik antara Tegangan Menengah (TM) dengan Tegangan Rendah (TR) dan Analisa Efisiensi Trafo Dalam Rangka Konservasi Energi Kampus UNDIP Tembalang” Semarang: Universitas Diponegoro.
- Kapahi .R. 2013. “*Load Flow Analysis of 132 kV substation using ETAP Software, & Technology*”, under Punjab Technical University, India., Volume 4.

- SPLN 41-8:1981. Hantaran alluminium campuran (AAAC). Perusahaan Listrik Negara
- SPLN D5.004-1:2012. Regulasi Harmonisa, Flicker, dan Ketidakseimbangan Tegangan. Perusahaan Listrik Negara
- Simamora, Yoakim.,& Tobing, Panusur S.M.L. 2014. "Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi untuk Identifikasi Beban Lebih dan Estimasi Rugi-Rugi pada Jaringan Tegangan Rendah", Vol 7 No 3, Juni 2014.
- Siregar, Rizky Syahputra.,& Harahap Raja. 2017. "Perhitungan Arus Netral, Rugi-Rugi dan Efisiensi Transformator Distribusi 3 Fase 20kV/400V di PT.PLN (Persero) Rayon Medan Timur Akibat Ketidakseimbangan Beban", journal of electrical technology, Vol 2 No 3, Oktober 2017.
- Sugianto.,Puspa,Untara. 2019. "Studi Susut Energi pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik melalui Analisis Pengukuran dan Perhitungan", Vol 21 No 2, April 2019.
- Vujosevic, L. Spahic E. and Rakocevic D. 2002. "*One Method for the Estimation of Voltage Drop in Distribution System*"IEEE power engineering society summer meeting, July 2002.